



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

Padrões de NDVI no desmatamento recente do ecótono Amazônia-Cerrado

Pedro Tourinho Dantas

Brasília – DF

2016

Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental

Padrões de NDVI no desmatamento recente do ecótono Amazônia-Cerrado

Orientador: Dr. Edson Eyji Sano

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento Ambiental.

Brasília – DF

2016

Agradecimentos

Meu obrigado,

À toda a minha família, a qual deu apoio à minha vinda pra Brasília e esteve sempre presente ao longo destes quatro anos cheios de saudade.

Ao meu orientador, Edson Eyji Sano, por me ajudar com o projeto nesta área completamente nova para mim. As orientações, sugestões, comentários objetivos e correções rápidas foram de muita importância para a produção deste trabalho e para o meu aprendizado.

Aos membros da banca examinadora, Cláudio Tavares Viana Teza e Gervásio Barbosa Soares Neto, pelo interesse e disponibilidade, bem como pelas contribuições feitas à esta monografia.

Ao corpo docente do IV Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental. As aulas ministradas e os trabalhos cobrados agregaram novos conhecimentos teóricos e técnicos que, com certeza, serão importantes para a minha vida profissional.

Ao corpo discente do IV Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental. Os bares frequentados e os churrascos realizados agregaram descontração ao longo do curso que, com certeza, também foram importantes para a realização deste trabalho.

À ESRI pela disponibilização do pacote de ferramentas que compõem a Família ArcGis 10.x por intermédio do contrato No 2011 MLK 8733 e à IMAGEM pelo apoio e viabilidade da concretização do termo de uso entre o Instituto de Geociências e a ESRI, bem como pelo suporte aos softwares.

Por fim, agradeço à Coordenadoria de Capacitação (PROCAP) do Decanato de Gestão de Pessoas (DGP) da Universidade de Brasília (UnB), por solicitar uma bolsa de estudos para que eu, como servidor da UnB, pudesse realizar este curso de especialização

e continuar progredindo como profissional. Da mesma forma, agradeço também aos responsáveis pelo IV Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental pela cessão da bolsa.

Sumário

RESUMO:	1
1. INTRODUÇÃO	2
1.1 Apresentação.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Localização da Área.....	3
2. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	4
2.1 Os ecótonos.....	4
2.2 A Biodiversidade nos Ecótonos.....	5
2.3 O Ecótono Amazônia - Cerrado.....	5
3. METODOLOGIA DE TRABALHO	8
3.1.1 Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto	8
3.1.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)	10
3.2.1 Processamento de Dados Espaciais.....	11
3.2.2 TerraClass	12
3.2.3 Regiões de Interesse (ROI).....	12
3.3 Testes Estatísticos	14
4. RESULTADOS	14
4.1 Áreas de Pasto.....	15
4.2 Áreas de Floresta.....	17
4.3 Áreas de Corte Raso.....	19
5. CONCLUSÕES	20
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

Padrões de NDVI no desmatamento recente do ecótono Amazônia - Cerrado

Pedro Tourinho Dantas¹ & Edson Eyji Sano²

RESUMO: A transição entre a Amazônia e o Cerrado é uma extensa zona de tensão ecológica na América do Sul, formada por um mosaico de savanas e florestas. Estas zonas de transição, ou ecótonos, desempenham um papel crucial no fluxo de espécies, de genes e de matéria entre áreas adjacentes. Uma noção amplamente difundida sobre ecótonos é a de que possuem maior diversidade biológica do que áreas adjacentes e, portanto, maior valor para a conservação. O ecótono Amazônia - Cerrado coincide espacialmente com o “arco do desmatamento”, que se inicia no Maranhão e margeia os limites sudeste, sul e sudoeste da Bacia Amazônica. A expansão da fronteira agrícola faz com que essas áreas ainda pouco conhecidas em termos de biodiversidade venham dando lugar a plantações de soja e fazendas de pecuária. Este trabalho se propôs a analisar padrões de NDVI nesta área, comparando dados dos anos de 2010 e 2015. Baseado em imagens Landsat, utilizamos o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para quantificar a diferença que ocorreu na vegetação entre o período analisado. Três alvos foram analisados: Pasto, Floresta e Corte Raso. Observamos que, de maneira geral, as médias dos valores de NDVI diminuíram dentre os anos. As áreas de pasto apresentaram um grande decréscimo, as áreas de floresta mostraram um decréscimo menor e as áreas de corte raso tiveram resultados mais diversos, com decréscimos pequenos, moderados, grandes e até mesmo um aumento deste índice nas cenas estudadas. É provável que uma diminuição dos valores pluviométricos entre os anos tenha levado ao resultado observado.

PALAVRAS-CHAVE: Landsat, Mato Grosso, Transição

¹ Programa de Especialização em Geoprocessamento Ambiental, Universidade de Brasília, 70910-900 Brasília, Distrito Federal, Brasil.

² Embrapa Cerrados, 73301-970 Planaltina, Distrito Federal, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Esta monografia apresenta-se como o documento final para o cumprimento do Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental, nível Lato Sensu, promovido pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

Dirigido aos profissionais de nível superior atuantes nas áreas de planejamento e meio ambiente (com áreas de formação diversas em agronomia, biologia, engenharias ambiental, civil e florestal, geologia, geografia, dentre outras), o curso objetiva capacitar seus participantes no uso das tecnologias de processamento e interpretação de imagens de sensores remotos orbitais, bem como no uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Para tal, o curso conta com disciplinas teórico-práticas que abordam conteúdos básicos e especializados da área do geoprocessamento. Isso dá aos participantes uma visão abrangente das possíveis aplicações desta ferramenta, ao mesmo tempo que os capacita a perseguir conhecimentos mais específicos que poderão ser utilizados na área de atuação profissional de cada um.

O curso foi ministrado entre os meses de março e dezembro de 2015, com carga horária total de 420 horas. O conteúdo

foi dividido em nove módulos, os quais são especificados a seguir: 1 - Cartografia básica e normalização de dados cartográficos (Carga Horária: 60 horas); 2 - Fundamentos de Sensoriamento Remoto (C.H.: 30 horas); 3 - Processamento e Interpretação de Imagens Multiespectrais (C.H.: 60 horas); 4 - Processamentos de Imagens Hiperespectrais (C.H.: 45 horas); 5 - Processamentos de Imagens de Alta Resolução Espacial (C.H.: 45 horas); 6 - Banco de Dados Espaciais (C.H.: 30 horas); 7 - Introdução ao SIG (C.H.: 30 horas); 8 - Análise e Modelagem Espacial (C.H.: 60 horas); e 9 - Seminários Temáticos (C.H.: 30 horas). As disciplinas foram ministradas por um corpo docente qualificado, composto por mestres e doutores, abordando um conteúdo atualizado. Este conteúdo atual se fez presente no ensinamento e utilização das versões mais recentes dos softwares empregados, bem como na abordagem de metodologias e tecnologias atuais, como por exemplo, o uso de VANT's para a obtenção de imagens.

Através deste trabalho final, espero demonstrar o conteúdo que aprendi ao longo do curso, aplicando-o à minha área de interesse profissional, no caso, o desmatamento no ecótono Amazônia - Cerrado.

A presente monografia segue o modelo recomendado pelo curso, baseado na Revista Brasileira de Geociências, e cujo objetivo é deixar o trabalho em um formato bem próximo de uma publicação em revista ou congresso. Na Introdução são apresentados os objetivos do trabalho e a localização da área de estudo. Na Descrição da Área de Estudo é feita uma breve revisão bibliográfica sobre a área selecionada, bem como os problemas que ela enfrenta e as justificativas para a sua escolha. Na Metodologia de Trabalho é informado os passos utilizados para o processamento das imagens de sensoriamento remoto e dos dados espaciais utilizados e as técnicas que foram empregadas para gerar os resultados obtidos. Nos Resultados, são apresentados os mapas e tabelas gerados e uma discussão é feita em cima deles. Por fim, uma breve Conclusão contextualiza os resultados alcançados e faz um apanhado geral do trabalho.

1.2 Objetivos

Este trabalho se propõe a analisar mudanças na vegetação em uma área do ecótono Amazônia - Cerrado, comparando dados dos anos de 2010 e 2015. Baseado em imagens Landsat, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) será utilizado para

quantificar diferenças que ocorreram na paisagem entre o período supracitado. Serão analisadas a variação deste índice em três tipos diferentes de alvo: Floresta, Pasto e Corte Raso. O objetivo deste trabalho é explorar os valores de NDVI obtidos para os diferentes alvos entre os diferentes anos, procurando estabelecer padrões para a área de estudo como um todo.

1.3 Localização da Área

A área de estudo localiza-se no estado do Mato Grosso e baseia-se em cenas obtidas através dos satélites Landsat. Especificamente, a área de estudo equivale às orbitas-ponto 224-69, 225-69, 226-69, 227-69, 228-69, 229-68 e 229-69 (Figura 1).

As referidas cenas abrangem uma área total de 220 mil Km² e cortam 40 municípios dos estados de Mato Grosso e Rondônia. Porém, neste trabalho serão levados em conta apenas aqueles que possuem mais de 40% do seu território dentro da área de estudo. São eles: Bom Jesus do Araguaia, Brasnorte, Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Canarana, Castanheira, Comodoro, Gaúcha do Norte, Itanhangá, Juína, Lucas do Rio Verde, Nova Maringá, Nova Mutum, Nova Ubatã, Paranatinga, Querência, Ribeirão Cascalheira, Santa Rita do Trivelato,

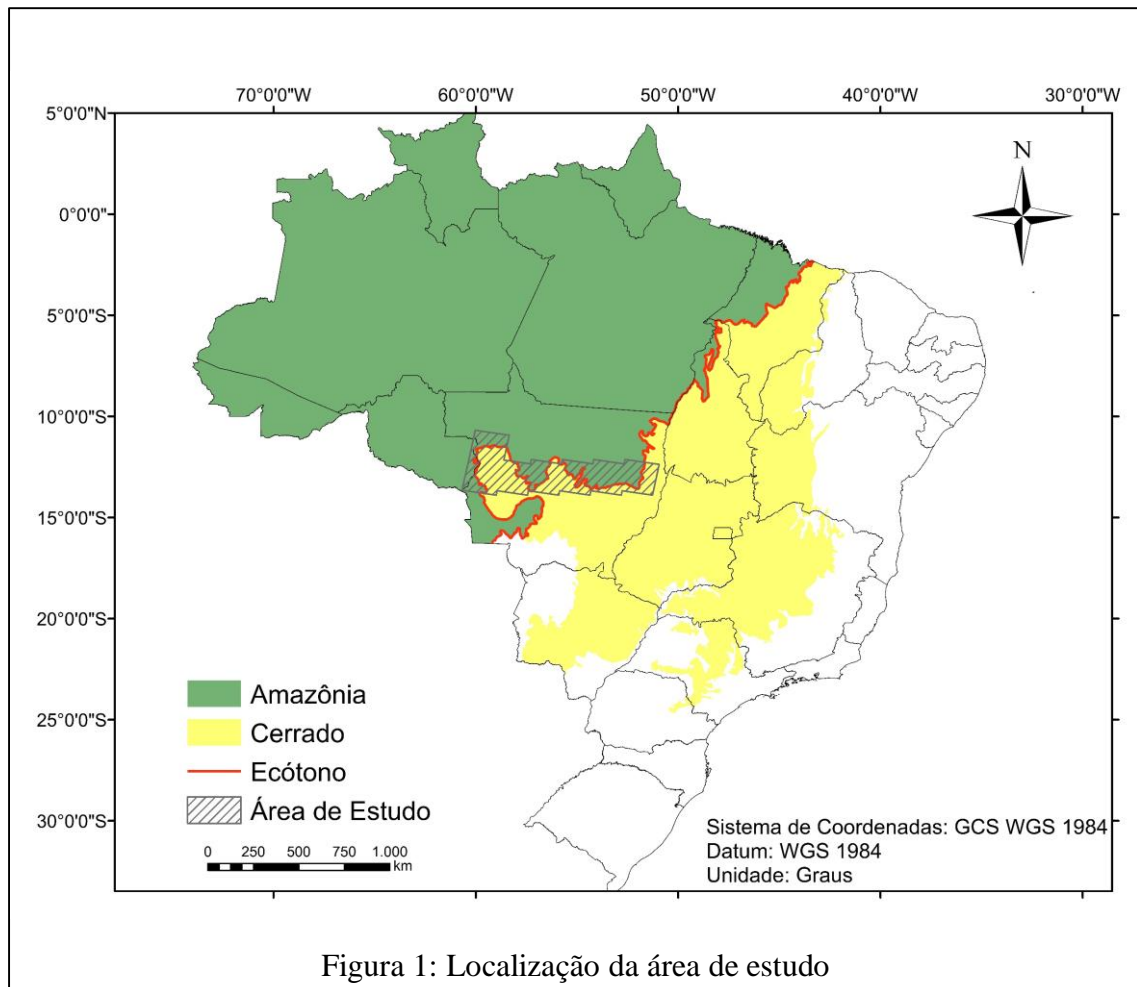


Figura 1: Localização da área de estudo

Sapezal, São José do Rio Claro, Sorriso, Tapurah e Vera, todos localizados no estado do Mato Grosso.

2. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Os ecótonos

Os limites ecológicos e seus gradientes estão entre os assuntos mais abordados na ecologia (Erdős *et al.*, 2011). Em despeito à pequena área que costumam ocupar, quando comparados com o resto da paisagem, estes limites parecem desempenhar um papel crucial no fluxo de espécies (Urbina-Cardona *et*

al., 2006), de genes (Smith *et al.*, 1997) e de matéria (Kolasa & Zalewski, 1995) entre áreas adjacentes. Os limites não apenas separam, mas também conectam estas áreas, agindo como filtros de permeabilidade variável (Wiens *et al.*, 1985). O conceito parece ter se originado com o reconhecimento de “zonas de tensão” entre comunidades vegetais (Livingston, 1903). O termo “ecótono” foi cunhado no início do século XX como referência à linha de estresse que “conecta pontos de mudança acumulada ou abrupta” (Clements, 1904). Aqui, nos referiremos ao ecótono como uma “zona de transição entre sistemas ecológicos

adjacentes, que possui características definidas por escalas de espaço e tempo, bem como pela força das interações entre os referidos sistemas” (di Castri *et al.*, 1988). A estrutura das comunidades varia com a proximidade do ecótono (e.g., Hofer *et al.*, 2000; Menke, 2003; Lloyd *et al.*, 2012) e a riqueza de espécies no ecótono pode ser maior que, menor que, ou intermediária entre as áreas adjacentes (van der Maarel, 1990). A compreensão dos padrões de riqueza nos ecótonos requer ainda o entendimento de fatores ligados à história e biogeografia das áreas, já que, em uma escala regional, os ecótonos resultando contato de diferentes regiões biogeográficas (Nogués-Bravo & Martinez-Rica, 2004).

2.2 A Biodiversidade nos Ecótonos

Uma noção amplamente difundida sobre ecótonos é a de que possuem maior diversidade biológica do que áreas adjacentes e, portanto, maior valor para a conservação (Risser, 1995; Kirkman *et al.*, 1998; Kernaghan & Harper, 2001). Isto ocorre devido a uma propriedade aditiva, onde os ecótonos seriam capazes de suportar espécies das áreas adjacentes (Senft, 2009). De forma oposta, a diversidade em ecótonos pode ser menor (Backeus, 1993; Dangerfield *et al.*, 2003) caso suas condições

ambientais sejam sub-ótimas em relação ao centro das áreas adjacentes, prejudicando o estabelecimento e a permanência das espécies (Temple, 1998).

A hipótese centro-periferia sustenta que as pressões seletivas variam do centro para a periferia de um bioma (Safriel *et al.*, 1994); assim, as populações e comunidades centrais apresentariam uma estrutura diferente daquelas periféricas (Pandey & Rajora, 2012). Em contraste com os ecótonos, cujas características principais parecem ser a heterogeneidade e a instabilidade (Kark & van Rensburg, 2006), as áreas centrais de um bioma são mais estáveis (Safriel *et al.*, 1994; Carnaval *et al.*, 2009; Werneck *et al.*, 2012). Áreas estáveis permitem um influxo de recursos mais constante e maior especialização de nicho (Pianka, 1966; Futuyma & Moreno, 1988), enquanto que áreas instáveis requerem a evolução de amplas tolerâncias para uma grande variação nas condições ambientais (Becking, 1968; Oindo, 2002).

2.3 O Ecótono Amazônia - Cerrado

A Amazônia e o Cerrado correspondem, respectivamente, aos dois maiores biomas brasileiros (IBGE, 2004). Ambos são extremamente heterogêneos, com distintas características de geologia,

pedologia e vegetação ao longo de suas extensões (Eiten, 1972; Prance & Lovejoy, 1985). O Cerrado se estende por 2 milhões de km² e ocupa cerca de 24 % do território brasileiro (IBGE, 2004). O clima é sazonal, com uma estação úmida entre os meses de outubro e março e uma estação seca entre abril e setembro; a temperatura média varia entre 22°C e 27°C e a precipitação média está em torno dos 1500 mm ao ano (Klink & Machado, 2005). As condições climáticas do Cerrado parecem favorecer o estabelecimento de florestas em boa parte da sua extensão (Oliveira-Filho & Ratter, 2002), mas características como latossolos pouco férteis e ricos em alumínio (Haridasan, 1982) e um regime de fogo constante (Miranda *et al.*, 2002) determinam a sua fisionomia savânica, caracterizada por abundantes gramíneas e uma biota adaptada ao fogo (Werneck, 2011). A Amazônia abrange 8 milhões de km², sendo 4,2 milhões em território brasileiro (IBGE, 2004). O clima é tropical úmido, com valores médios de temperatura entre 24°C e 26°C e uma precipitação média de 2300mm ao ano (Fisch *et al.*, 1998). De maneira geral, o solo amazônico é ácido e pouco fértil, sendo um fator limitante para a produtividade das florestas (Cunha *et al.*, 2007). No entanto, esta carência é compensada por uma serapilheira rica

em nutrientes que, juntamente com uma alta temperatura e pluviosidade, consegue manter um sistema florestal produtivo e diverso (Schuur, 2003; Moreira & Costa, 2004).

A transição entre a Amazônia e o Cerrado é uma extensa zona de tensão ecológica na América do Sul, formada por um mosaico de savanas e florestas (Ratter *et al.*, 1973; Ackerly *et al.*, 1989; Ratter, 1992). Este mosaico é irregular, apresentando características singulares e recortes de diferentes tamanhos ao longo de sua extensão (Marimon *et al.*, 2006).

A zona de transição coincide espacialmente com o “arco do desmatamento”, que se inicia no Maranhão e margeia os limites sudeste, sul e sudoeste da Bacia Amazônica (Ferreira *et al.*, 2005; Fearnside & Graça, 2006; Aldrich *et al.*, 2012). A expansão da fronteira agrícola, principalmente nas regiões de Rondônia e norte do Mato Grosso, vem dando lugar a plantações de soja e fazendas de pecuária (Fearnside, 2001; Laurance *et al.*, 2004; Fearnside, 2006). Existe pouca informação sobre como as espécies de vertebrados se distribuem através desta paisagem (Lacher & Alho, 2001) e a falta de conservação desta área pouco estudada parece ofuscar a detecção de processos ecológicos que estariam ocorrendo no ecótono (Marimon *et al.*, 2006).

Trabalhos botânicos corroboram as hipóteses de (1) maior diversidade no ecótono, devido a propriedades aditivas (Ackerly *et al.*, 1989), e (2) que comunidades centrais e periféricas

apresentam estruturas diferentes (Marimon *et al.*, 2006).

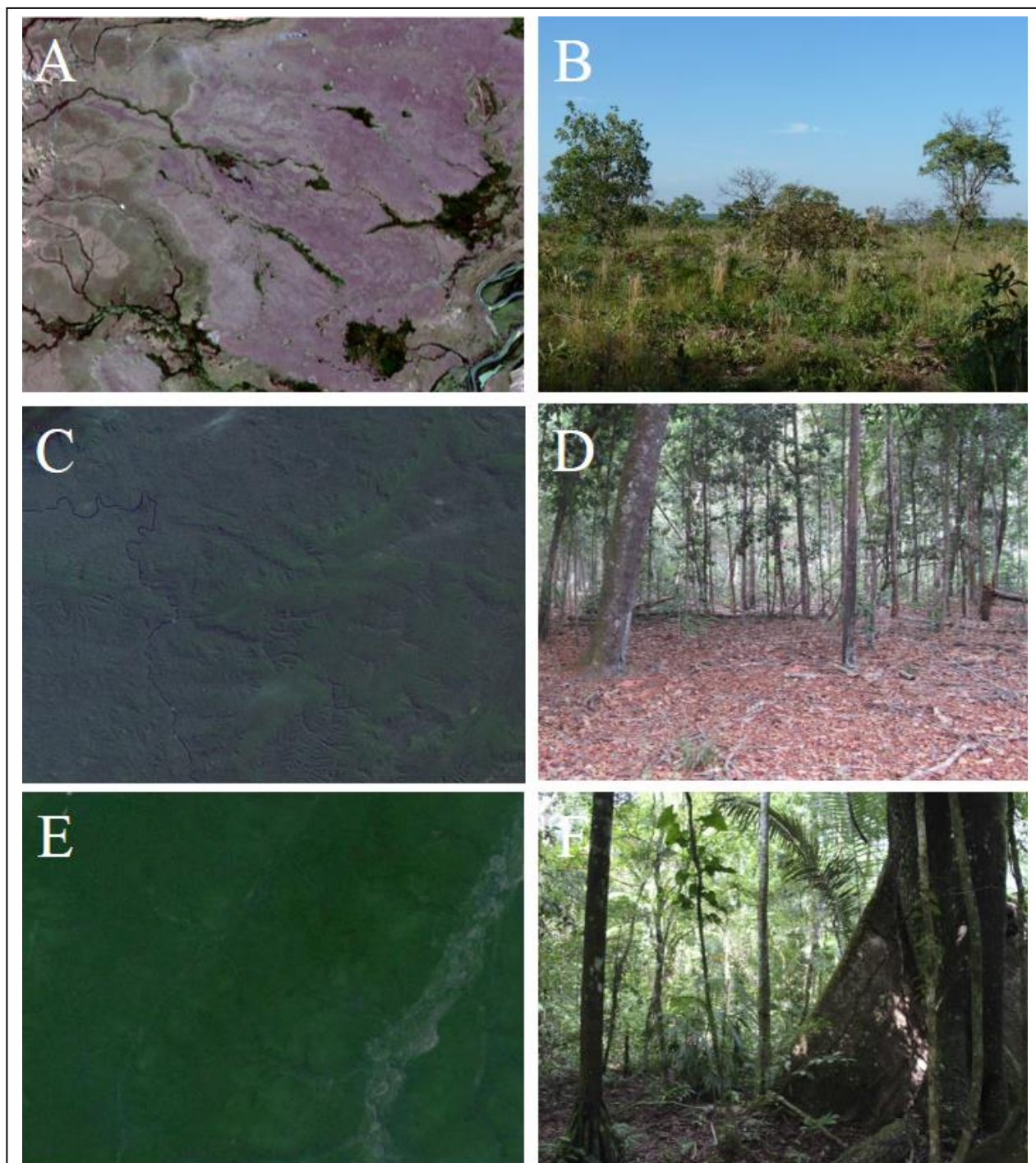


Figura 2: Imagens Landsat 8 e fotografias a nível do chão do Cerrado (A e B), Ecótono (C e D) e Amazônia (E e F).

3. METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1.1 Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto

As imagens utilizadas neste trabalho foram adquiridas pelos satélites Landsat 5 (imagens de 2010) e Landsat 8 (imagens de 2015). O Landsat 5 operava por meio do sensor *Thematic Mapper* (TM), o qual esteve ativo entre março de 1984 e junho de 2013 (U.S.G.S., 2014) (Quadro 1). Capturando imagens em 6 bandas multiespectrais e 1 banda termal,

este sensor apresentava uma resolução espacial de 30 metros (120 metros para a banda termal) e uma resolução radiométrica de 8 bits (256 níveis de cinza). O Landsat 5 revisitava a mesma área a cada 16 dias, com faixa de imageamento de aproximadamente 185 x 185 km.

O Landsat 8, lançado em fevereiro de 2013 e ainda ativo, possui equipamentos mais modernos. Os seus sensores são o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIS), os quais capturam imagens em 9 bandas

Quadro 1: Diferentes bandas capturadas pelos sensores adotados com seus respectivos comprimentos de onda e resolução espacial

	Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Resolução Espacial (m)
Landsat 5 Sensor Thematic Mapper (TM)	1	0,45 - 0,52	30
	2	0,52 - 0,60	30
	3	0,63 - 0,69	30
	4	0,76 - 0,90	30
	5	1,55 - 1,75	30
	6	10,40 - 12,50	120
	7	2,08 - 2,35	30

	Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Resolução Espacial (m)
Landsat 8 Sensores Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS)	1 - Litoral/Aerossol	0,43 - 0,45	30
	2 - Azul	0,45 - 0,51	30
	3 - Verde	0,53 - 0,59	30
	4 - Vermelho	0,64 - 0,67	30
	5 - Infravermelho próximo	0,85 - 0,88	30
	6 - SWIR 1	1,57 - 1,65	30
	7 - SWIR 2	2,11 - 2,29	30
	8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15
	9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
	10 - Infravermelho Termal 1	10,60 - 11,19	100
	11 - Infravermelho Termal 2	11,50 - 12,51	100

multiespectrais e 2 bandas termais (U.S.G.S., 2015b). As bandas multiespectrais apresentam uma resolução espacial de 30 metros (15 metros para a banda pancromática), enquanto que as bandas termais são obtidas em uma resolução de 100 metros, as quais são reamostradas para 30 metros no produto final. A resolução radiométrica destes sensores é de 12 bits, porém, disponibilizada em 16 bits para os usuários em geral, o que produz imagens em um intervalo de 65.536 níveis de cinza. Da mesma maneira que o Landsat 5, o Landsat 8 gera imagens da mesma área a cada 16 dias e cada

imagem abrange uma área de aproximadamente 185 x 185 km.

Para este trabalho, as imagens Landsat foram adquiridas através do site Earth Explorer (U.S.G.S., 2015a), para as órbitas-ponto 224-69, 225-69, 226-69, 227-69, 228-69, 229-68 e 229-69 (Figura 3). Para atender a finalidade de comparação entre os anos, as imagens utilizadas são do mesmo período anual, as quais foram capturadas entre os meses de agosto e setembro (Tabela 1). Estes meses costumam apresentar menos nuvens interferindo nas imagens (Sano *et al.*, 2007). Além disso um filtro de busca foi utilizado para que somente as

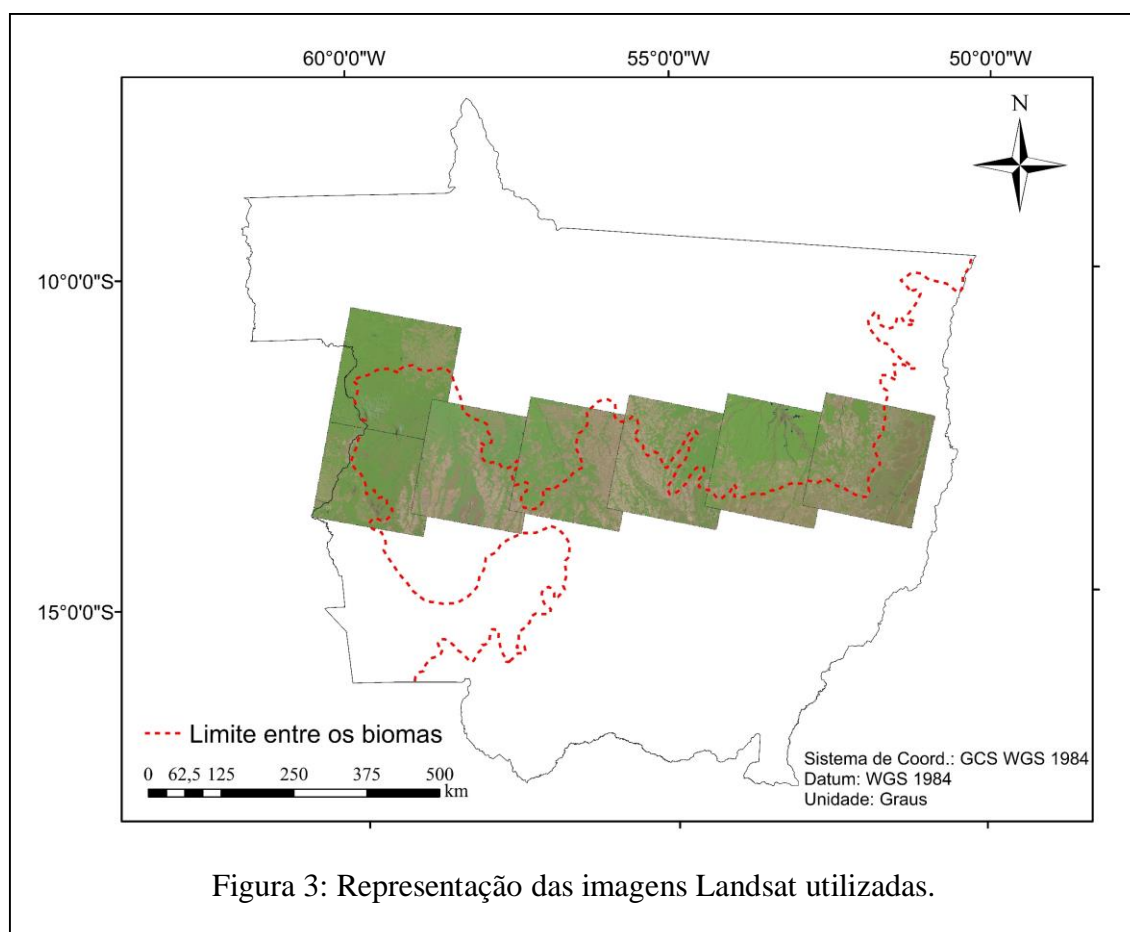


Tabela 1: Imagens utilizadas para cada órbita-ponto e suas respectivas datas de obtenção.

Órbita-Ponto	Imagem Landsat 5	Data	Imagem Landsat 8	Data
224-69	LT52240692010255	12/09/2010	LC82240692015221	09/08/2015
225-69	LT52250692010246	03/09/2010	LC82250692015244	01/09/2015
226-69	LT52260692010253	10/09/2010	LC82260692015235	23/08/2015
227-69	LT52270692010244	01/09/2010	LC82270692015242	30/08/2015
228-69	LT52280692010251	08/09/2010	LC82280692015249	06/09/2015
229-68	LT52290682010226	14/08/2010	LC82290682015224	12/08/2015
229-69	LT52290692010226	14/08/2010	LC82290692015224	12/08/2015

imagens com menos de 10% de cobertura de nuvens fossem utilizadas.

3.1.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI é um índice obtido a partir da seguinte fórmula (Rouse *et al.*, 1973):

$$NDVI = \frac{(IVP - VER)}{(IVP + VER)}$$

onde *IVP* é a medida de reflectância espectral adquirida na faixa do infravermelho próximo e *VER* na faixa do vermelho.

A vegetação fotossinteticamente ativa absorve a radiação solar na região do vermelho, pois utiliza esta radiação como fonte de energia durante o processo de fotossíntese (Gates *et al.*, 1965). De maneira oposta, a radiação na faixa do infravermelho próximo é

fortemente refletida pela superfície foliar saudável. No entanto, a absorção do vermelho e a reflexão do infravermelho irão variar de acordo com o estado da planta. Quanto mais bem supridas do ponto de vista hídrico, e por consequência mais verdes, maior será a absorção do vermelho e a reflexão do infravermelho. Assim, as diferenças serão maiores quanto mais verde for a vegetação. Desta maneira, os valores de NDVI podem variar entre -1 e 1, onde valores próximos de zero são representados por superfícies sem vegetação, valores baixos estão associados à vegetação arbustiva ou savânica (incluindo pastos) e valores altos são apresentados por florestas.

O NDVI tem sido empregado nos mais diversos estudos ambientais. Vemos este índice sendo aplicado em trabalhos que investigam produção de

biomassa (Anderson *et al.*, 1993), monitoramento e detecção de mudanças na vegetação (Fuller, 1998; Malmstrom *et al.*, 2009), impacto e manejo de pastejo (Todd *et al.*, 1998), fluxo e sequestro de carbono (Gilmanov *et al.*, 2004), entre outros.

É sabido que efeitos atmosféricos podem resultar em impactos significantes nos valores de NDVI e que é recomendado o emprego de técnicas de correção atmosférica ao se trabalhar com este índice (Agapiou *et al.*, 2011). Para contornar este problema, as imagens utilizadas neste trabalho foram baixadas do Earth Explorer já convertidas em valores de reflectância de superfície, uma vez que o projeto oferece esta opção.

Com as imagens Landsat convertidas em valores de reflectância, os valores de NDVI para cada imagem foram obtidos através da ferramenta *NDVI* do programa ENVI 5.1. Para as imagens do Landsat 5, as bandas utilizadas foram as 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo) e para as imagens do Landsat 8 utilizamos as bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo).

Para minimizar influências de variáveis que podem alterar o valor de NDVI, mas que não estão diretamente ligadas a fatores de vegetação (mudanças

no clima ou no terreno, por exemplo), foi adotado um procedimento envolvendo matemática de bandas. Primeiro, foram geradas regiões de interesse (ROI – do inglês *region of interest*) sobre áreas de mata de galeria, uma vez que estes alvos podem ser considerados constantes ao longo do tempo (há pouca variação de NDVI entre diferentes anos). Calculou-se então o NDVI médio destas ROI's para os diferentes períodos de estudo (2010 e 2015) e em seguida a diferença entre essas médias. Este valor de diferença das médias foi então adicionado nas imagens a serem equalizadas através da ferramenta *Band Math* do programa ENVI 5.1.

3.2.1 Processamento de Dados Espaciais

As imagens Landsat utilizadas neste trabalho foram adquiridas já georreferenciadas e ortorretificadas, estando no sistema de projeção UTM e no sistema de referência geodésico WGS 84. Já os dados de classificação de cobertura do solo que foram utilizados (explicados melhor no tópico abaixo) são originalmente disponibilizados no sistema de coordenadas geográficas (latitude e longitude) e sistema de referência geodésico SAD 69. Dessa forma, para que pudéssemos sobrepor os dados, uma transformação foi necessária.

Então, com o emprego da ferramenta *Project* do programa ArcGIS 10.1, os sistemas de projeção e de referência geodésico dos polígonos de cobertura do solo foram reprojatados para coincidir com aqueles das imagens utilizadas.

3.2.2 TerraClass

O projeto TerraClass, desenvolvido através de uma parceria entre equipes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), tem como objetivo a qualificação do desflorestamento da Amazônia Legal (INPE, 2012). Para tal, o projeto se utiliza de dados publicados pelo projeto PRODES (Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite) e imagens do satélite Landsat 5 (sensor TM), mapeando o uso e a cobertura do solo desta região. Dessa forma, 16 classes são geradas (Agricultura anual, Área não observada, Área urbana, Desflorestamento, Floresta, Hidrografia, Mineração, Mosaico de Ocupação, Não floresta, Outros, Pasto com solo exposto, Pasto limpo, Pasto sujo, Reflorestamento, Regeneração com pasto e Vegetação secundária). O acompanhamento da variação dessas classes ao longo dos anos do projeto (2008, 2010 e 2012) permite uma avaliação dinâmica do uso do solo na

Amazônia Legal. Os dados do TerraClass são disponibilizados seguindo as órbitas-ponto dos satélites Landsat, o que facilitou a sobreposição destes dados com as imagens utilizadas.

No presente trabalho, foram analisadas três das classes supracitadas (Desflorestamento, Floresta e Pasto limpo), tendo como base os dados do TerraClass 2010 (para coincidir com as imagens do Landsat 5 utilizadas) (Figura 4).

3.2.3 Regiões de Interesse (ROI)

Baseado nas imagens do Landsat 5 e nas classificações do TerraClass 2010, foram criadas regiões de interesse (ROI – do inglês *region of interest*) que estivessem contidas em cada uma das três classes empregadas neste trabalho. Para cada classe, 50 ROI's foram criadas e cada ROI possuía uma dimensão de 16 x 16 pixels (ou 480 x 480 metros). As 50 ROI's foram então espalhadas pela paisagem de modo que abrangessem diferentes áreas da imagem e não estivessem muito próximos dos limites da classificação. Especificamente para a classe “Desflorestamento”, a área abrangida pelas ROI's era superior à área total desta classe, de modo que as ROI's para esta classe acabaram sendo os próprios polígonos do TerraClass (Figura 5).

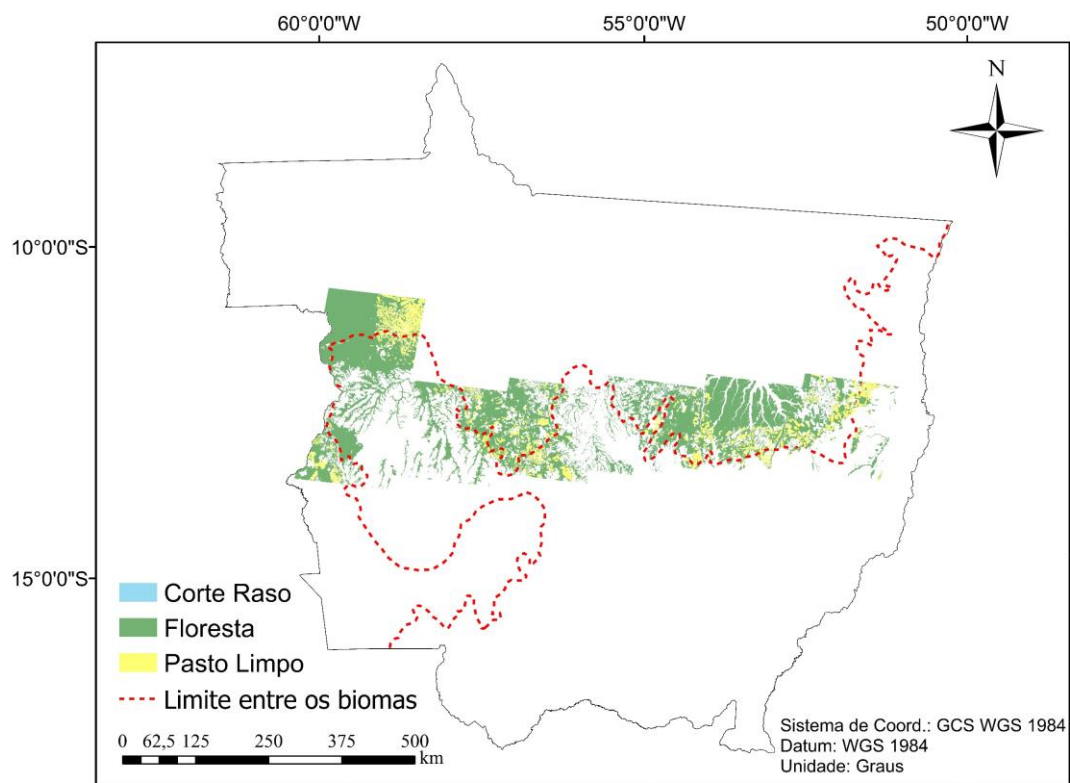


Figura 4: Representação das classificações do TerraClass utilizadas.

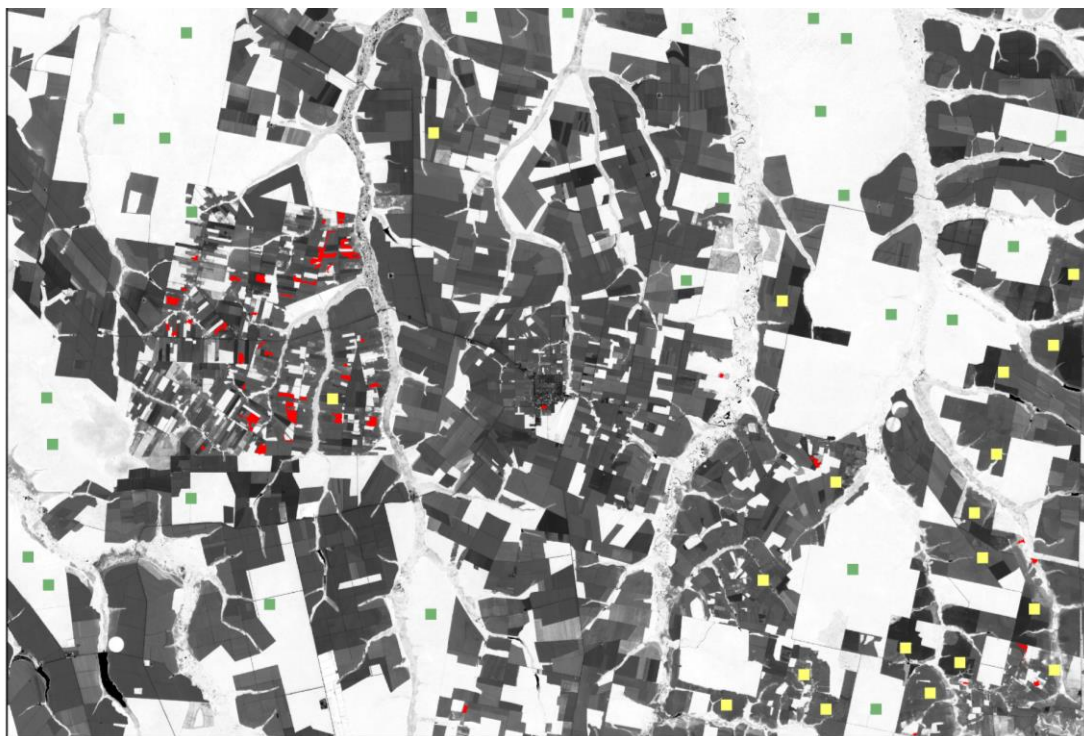


Figura 5: Amostra das ROI's distribuídas pela paisagem, onde os polígonos verdes representam os pontos amostrais nas áreas de floresta, os amarelos nas áreas de pasto limpo e os vermelhos nas áreas de desflorestamento.

Posteriormente, essas ROI's foram sobrepostas às imagens de NDVI do Landsat 5 (2010) e Landsat 8 (2015) e os dados relativos a estas áreas foram amostrados através dos pacotes *maptools* (Bivand & Lewin-Koh, 2015) e *raster* (Hijmans, 2015) da linguagem R (R Core Team, 2015). Dessa forma, foram obtidos dados dos valores de NDVI das diferentes classes de uso do solo (Desflorestamento, Floresta e Pasto limpo), entre as diferentes imagens utilizadas (órbitas-ponto 224-69, 225-69, 226-69, 227-69, 228-69, 229-68 e 229-69), para os diferentes anos (2010 e 2015).

3.3 Testes Estatísticos

Primeiramente foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para verificar se as distribuições dos valores de NDVI se enquadravam numa distribuição normal. Visto que não, foram realizados testes de Wilcoxon com a finalidade de definir se a variação dos valores médios de NDVI nas diferentes cenas foi estatisticamente significativa. O nível de significância adotado foi de 0,05.

Posteriormente, foram produzidos gráficos de dispersão que mostrassem a variação de NDVI das diferentes classes entre os diferentes anos. Adicionalmente foram feitos testes

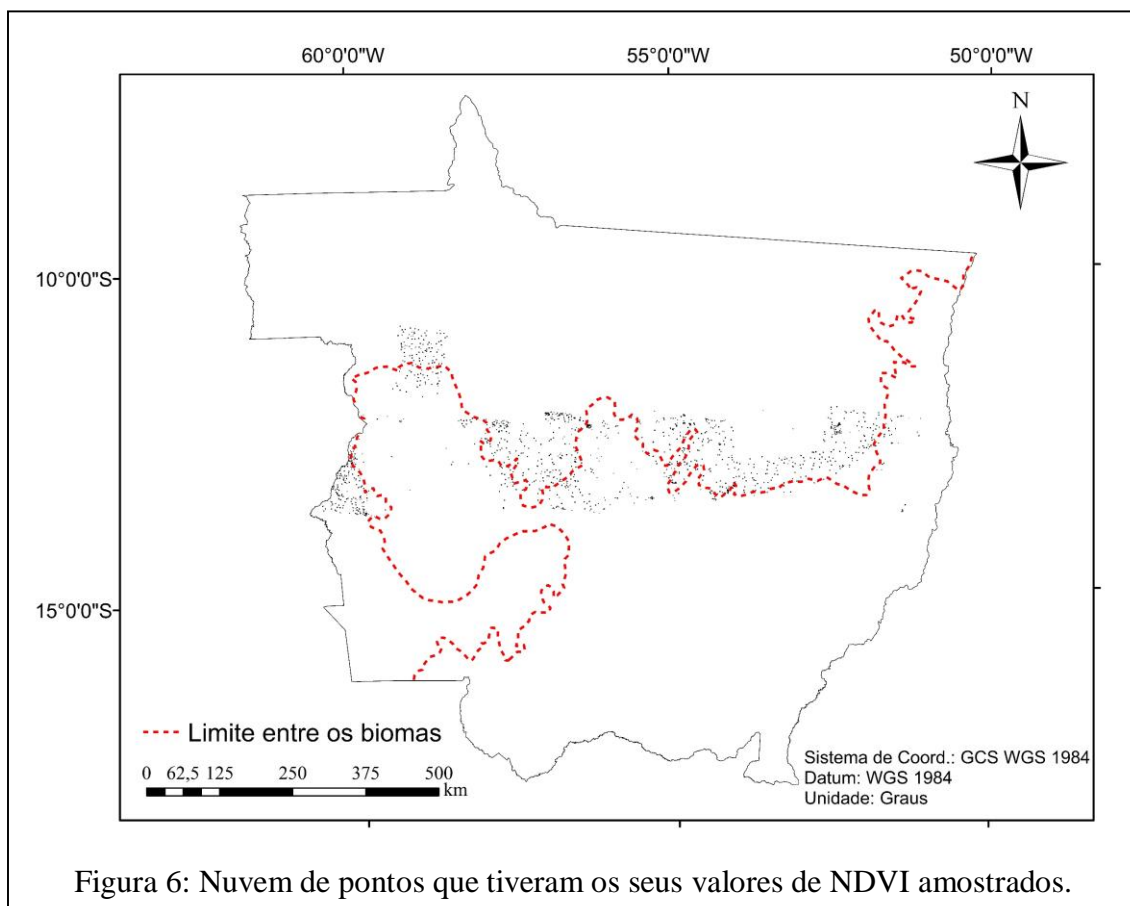
de correlação de Spearman para quantificar esta variação.

Todos os testes citados foram realizados utilizando o pacote base da linguagem R (R Core Team, 2015).

4. RESULTADOS

Ao todo, foram amostrados 1363 pontos na área de transição Amazônia-Cerrado (Fig. 6). De maneira geral, pudemos observar que as médias dos valores de NDVI diminuíram entre os anos de 2010 e 2015 (Figura 7, Tabelas 1, 2 e 3), sendo que as particularidades de cada caso serão abordadas individualmente em tópicos que seguem.

Sabe-se que o desmatamento mais ativo tem lugar no sudeste da Amazônia, impulsionado principalmente por plantações de soja em larga escala e pecuária (Fearnside, 2001; Laurance *et al.*, 2004; Fearnside & Graça, 2006). O ecótono Amazônia-Cerrado no Mato Grosso é provavelmente a primeira parte da Amazônia a mostrar sinais precoces de impactos climáticos, provavelmente impulsionados pelo desmatamento. Por exemplo, a região é caracterizada por uma fisionomia típica, um "cerradão" distrófico, (Ratter *et al.*, 1973) que, aparentemente, avançou sete quilômetros sobre áreas de cerrado sensu stricto nos últimos anos (Marimon *et al.*,



2006). Por outro lado, modelos climáticos preveem a expansão das savanas no leste da Amazônia se secas severas se tornarem mais frequentes (Salazar *et al.*, 2007).

4.1 Áreas de Pasto

As áreas de pasto apresentaram um grande decréscimo nos valores médios de NDVI entre os anos de 2010 e 2015, em todas as cenas estudadas (Tabela 2).

A predição inicial era que essas áreas se mantivessem estáveis entre os anos, uma vez que era esperado que o tipo de vegetação encontrada nesta classe se mantivesse constante. No

entanto, este foi o tipo de paisagem que mais sofreu decréscimo entre os anos estudados. Uma correlação moderada entre os valores de NDVI dos diferentes anos (Fig. 8A) sugere que fatores externos estejam influenciando a variação deste índice para as áreas de pasto. Entre os motivos que poderiam explicar o resultado observado, a literatura destaca a variação na temperatura, regime de chuvas (Schultz & Halpert, 1993) e/ou uma variação na fertilidade do solo (Flynn, 2006).

Uma vez que as imagens utilizadas neste trabalho são todas do mesmo período do ano (agosto e setembro, estação seca na região),

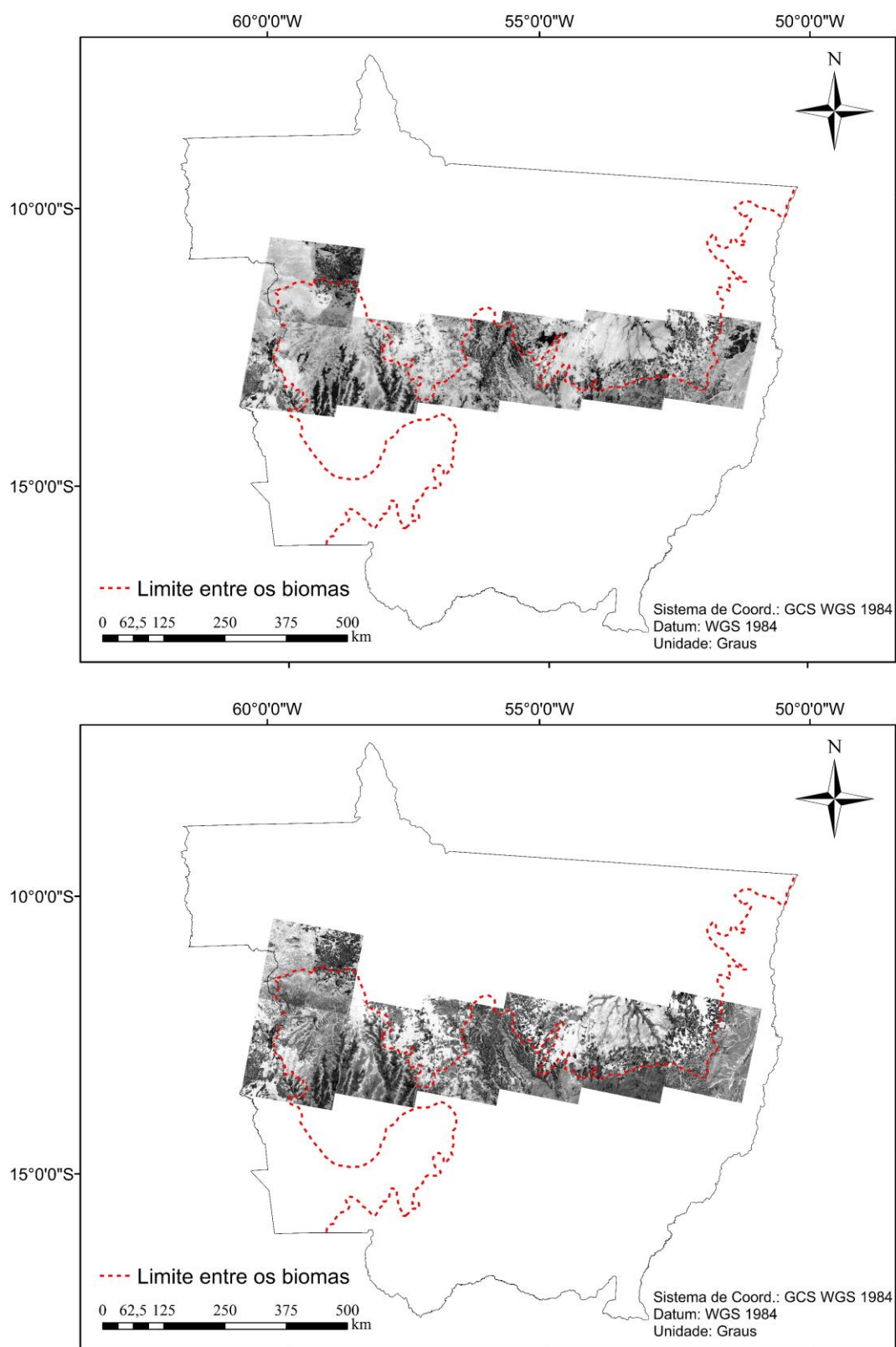


Figura 7: Imagens convertidas em valores de NDVI dos anos de 2010 (acima) e 2015 (abaixo)

Tabela 2: Valores médios e desvio padrão dos valores de NDVI obtidos nos anos de 2010 e 2015 para as **Áreas de Pasto**. O número amostral está representado por “n”. O “Valor V” é o resultado do teste de Wilcoxon e o “Valor p”, o nível de significância.

Cena	Média ± Desvio Padrão do NDVI em 2010	Média ± Desvio Padrão do NDVI em 2015	n	Valor V	Valor p
224_69	0,24 ± 0,03	0,13 ± 0,07	50	1268	< 0,001
225_69	0,28 ± 0,08	0,14 ± 0,12	50	1230	< 0,001
226_69	0,28 ± 0,07	0,02 ± 0,11	50	1274	< 0,001
227_69	0,29 ± 0,05	0,09 ± 0,08	50	1275	< 0,001
228_69	0,31 ± 0,07	0,26 ± 0,11	50	1144	< 0,001
229_68	0,34 ± 0,04	0,25 ± 0,05	50	1275	< 0,001
229_69	0,37 ± 0,05	0,32 ± 0,08	50	1134	< 0,001

podemos descartar a variação sazonal anual da pluviosidade como uma hipótese que explique o decréscimo observado. Averiguamos então os valores de pluviosidade de 2010 e 2015 para a região (INMET, 2015) e observamos que, de fato, houve uma diminuição do volume de chuva nos meses que antecederam o registro das imagens, quando comparados estes diferentes anos.

A respeito da variação na fertilidade do solo com os valores de NDVI, esta relação se estabeleceria dado que o conteúdo de clorofila na folha é diretamente afetado pela disponibilidade de água e nitrogênio na região da raiz (Schlemmer *et al.*, 2005). No entanto, nós não obtivemos dados que pudessem relacionar estas duas variáveis.

4.2 Áreas de Floresta

As áreas de floresta também apresentaram um decréscimo nos valores médios de NDVI, porém não em todas as cenas estudadas (Tabela 3). Além disso, este decréscimo foi menor quando comparado com aquele observado entre as áreas de pasto.

Era esperado que, seguindo uma tendência já relatada de desmatamento na área (Fearnside *et al.*, 2009), algumas áreas de floresta amostradas dessem lugar a paisagens que apresentassem um menor NDVI (áreas de corte raso, pastagem ou agricultura), diminuindo assim o NDVI médio de cada uma das cenas, porém isto não foi o observado. Esta classe foi a que apresentou o maior índice de correlação (Fig. 8B), indicando que os pontos amostrais que possuíam

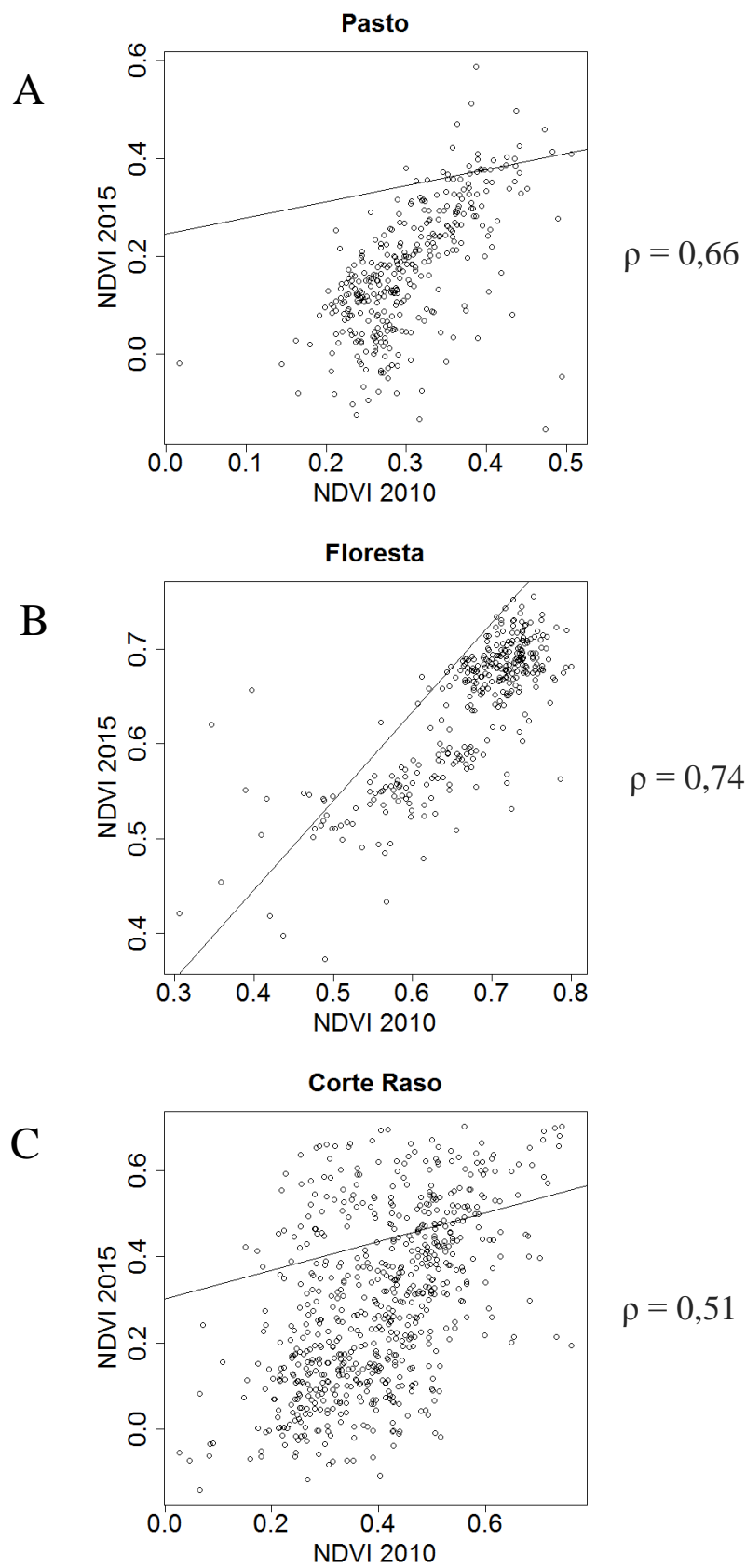


Figura 8: Gráficos de dispersão e índices de correlação (ρ) dos valores de NDVI entre os anos de 2010 e 2015. A: Áreas de Pasto; B: Áreas de Floresta; C: Áreas de Corte Raso

Tabela 3: Valores médios e desvio padrão dos valores de NDVI obtidos nos anos de 2010 e 2015 para as **Áreas de Floresta**. As siglas seguem a Tabela 2.

Cena	Média ± Desvio Padrão do NDVI em 2010	Média ± Desvio Padrão do NDVI em 2015	n	Valor V	Valor p
224_69	0,72 ± 0,06	0,68 ± 0,02	50	1182	< 0,001
225_69	0,72 ± 0,04	0,68 ± 0,05	50	1270	< 0,001
226_69	0,50 ± 0,12	0,50 ± 0,10	50	656	0,8621
227_69	0,61 ± 0,07	0,56 ± 0,05	50	1211	< 0,001
228_69	0,70 ± 0,07	0,70 ± 0,05	50	657	0,8545
229_68	0,69 ± 0,05	0,67 ± 0,04	50	1014	< 0,001
229_69	0,70 ± 0,03	0,65 ± 0,04	50	1204	< 0,001

vegetação florestal em 2010 tenderam a apresentar esse tipo de cobertura em 2015. Isso provavelmente ocorreu devido ao fato da maioria das áreas de floresta amostrada se encontrar em Áreas de Proteção Permanente (APP), uma vez que estão próximas a rios, ou estão em locais de difícil acesso, o que dificultaria a conversão dessa vegetação em paisagens antrópicas.

Esta pequena variação negativa também pode ser atribuída a um decréscimo da pluviosidade entre os anos. Porém, uma vez que áreas de floresta tendem a reter melhor a água no ambiente (Teepe *et al.*, 2003), a variação nos valores de NDVI foi mais sutil, quando comparada com as áreas de pasto. Em duas das cenas estudadas, esta variação não chegou a ser estatisticamente significativa (Tabela 2).

Nesses casos, devemos também levar em conta a variação espacial do NDVI, já que mesmo em áreas próximas nós podemos observar uma variação neste índice, sejam por motivos de clima, topografia ou proximidade com áreas degradadas (Zhang *et al.*, 2014).

4.3 Áreas de Corte Raso

Esta classe foi a que apresentou os resultados mais diversos, com resultados não significativos, decréscimos pequenos, moderados e grandes nos valores médios de NDVI e até mesmo um aumento deste índice em uma das cenas estudadas (Tabela 4).

Essa heterogeneidade é refletida no gráfico de dispersão e no índice de correlação não muito alto (Fig. 8C), os quais indicam que entre os anos de 2010 e 2015 as áreas de corte raso foram as

Tabela 4: Valores médios e desvio padrão dos valores de NDVI obtidos nos anos de 2010 e 2015 para as **Áreas de Corte Raso**. As siglas seguem a Tabela 2.

Cena	Média ± Desvio Padrão do NDVI em 2010	Média ± Desvio Padrão do NDVI em 2015	n	Valor V	Valor p
224_69	0,33 ± 0,09	0,25 ± 0,16	77	2330	< 0,001
225_69	0,37 ± 0,13	0,48 ± 0,16	39	149	< 0,001
226_69	0,30 ± 0,11	0,11 ± 0,16	118	6644	< 0,001
227_69	0,39 ± 0,10	0,21 ± 0,15	214	22526	< 0,001
228_69	0,45 ± 0,13	0,47 ± 0,11	44	431	0,4624
229_68	0,54 ± 0,09	0,44 ± 0,13	62	1735	< 0,001
229_69	0,46 ± 0,11	0,43 ± 0,15	109	3698	0,034

que apresentaram a maior variação nos seus valores de NDVI.

Para este tipo de paisagem, o esperado era que justamente houvesse um aumento nos valores médios de NDVI. Isso aconteceria devido ao fato de que as áreas desmatadas observadas em 2010 dariam lugar a pastos ou plantações em 2015. O corte raso, sem vegetação, daria então lugar a áreas com algum tipo de vegetação, aumentando os valores de NDVI. Este fato, no entanto, foi observado em apenas uma das cenas. Nós não levantamos o tipo de cultura que sucedeu os pontos desmatados, nem o estágio em que a cultura se encontrava quando as imagens foram novamente tomadas em 2015. Há a possibilidade das imagens de 2015 registrarem momentos de plantio, entressafra ou pós-colheita, as quais apresentam baixos valores de

NDVI, ou até mesmo cultivo de plantas madeireiras como a teca, o que apresentaria um valor de NDVI mais alto.

De fato, a caracterização de áreas desmatadas com o emprego do NDVI utiliza séries temporais grandes para a detecção de padrões (Brown *et al.*, 2006; Baldi *et al.*, 2008), de maneira que neste estudo só podemos confirmar a versátil dinâmica deste tipo de paisagem.

5. CONCLUSÕES

Apesar de observado um decréscimo nos valores de NDVI entre os anos de 2010 e 2015, através dos dados levantados nós não pudemos relacionar este fato a um aumento no desmatamento da região. É mais provável que uma diminuição dos valores pluviométricos entre os anos tenha levado ao resultado observado.

No entanto, é sabido que o desmatamento na Amazônia pode promover mudanças ambientais em amplas escalas, como alterações no fluxo de carbono e biomassa (Nogueira *et al.*, 2007), aumento das emissões de gases do efeito estufa (Fearnside *et al.*, 2009) e dessecação e aquecimento do clima, com uma intensificação da estação seca e do déficit hídrico, especialmente no sudeste da Amazônia (Costa & Pires, 2010). Áreas ecotonais podem abrigar populações geneticamente diversas (Garner *et al.*, 2004), resistentes a mudanças ambientais (Parsons, 1990), e que conseguiriam se manter em um ambiente instável. Frente às previsões de mudanças climáticas globais, as zonas de transição se mostram como um importante reservatório de variedade genética (Killeen & Solórzano, 2008). No entanto, o ecótono Amazônia/Cerrado ainda é um ambiente pouco estudado e a sua localização no arco do desmatamento torna ainda mais difícil a compreensão de seus padrões e processos.

6.REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

Ackerly, D.D., Thomas, W.W., Ferreira, C.A.C. & Pirani, J.R. (1989) The Forest-Cerrado Transition Zone in Southern Amazonia - Results of the 1985 Projeto Flora Amazonica

- Expedition to Mato-Grosso. *Brittonia*, **41**, 113-128.
- Agapiou, A., Hadjimitsis, D.G., Papoutsas, C., Alexakis, D.D. & Papadavid, G. (2011) The Importance of Accounting for Atmospheric Effects in the Application of NDVI and Interpretation of Satellite Imagery Supporting Archaeological Research: The Case Studies of Palaepaphos and Nea Paphos Sites in Cyprus. *Remote Sensing*, **3**, 2605.
- Aldrich, S., Walker, R., Simmons, C., Caldas, M. & Perz, S. (2012) Contentious land change in the Amazon's Arc of Deforestation. *Annals of the Association of American Geographers*, **102**, 103-128.
- Anderson, G.L., Hanson, J.D. & Haas, R.H. (1993) Evaluating landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. *Remote Sensing of Environment*, **45**, 165-175.
- Backeus, I. (1993) Ecotone Versus Ecocline - Vegetation Zonation and Dynamics around a Small Reservoir in Tanzania. *Journal of Biogeography*, **20**, 209-218.
- Baldi, G., Noisetto, M., Aragón, R., Aversa, F., Paruelo, J. & Jobbágy, E. (2008) Long-term Satellite NDVI Data Sets: Evaluating Their Ability to Detect Ecosystem Functional Changes in South America. *Sensors*, **8**, 5397.
- Becking, R.W. (1968) Vegetational Response to Change in Environment and Change in Species Tolerance with Time. *Vegetatio*, **16**, 135-158.
- Bivand, R. & Lewin-Koh, N. (2015) *maptools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects*.
- Brown, M.E., Pinzon, J.E., Didan, K., Morisette, J.T. & Tucker, C.J. (2006) Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors. *Geoscience and*

- Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **44**, 1787-1793.
- Carnaval, A.C., Hickerson, M.J., Haddad, C.F., Rodrigues, M.T. & Moritz, C. (2009) Stability predicts genetic diversity in the Brazilian Atlantic forest hotspot. *Science*, **323**, 785-9.
- Clements, F.E. (1904) *The development and structure of vegetation*. The Botanical Seminar, Lincoln.
- Costa, M.H. & Pires, G.F. (2010) Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *International Journal of Climatology*, **30**, 1970-1979.
- Cunha, T.J.F., Madari, B.E., Benites, V.d.M., Canellas, L.P., Novotny, E.H., Moutta, R.d.O., Trompowsky, P.M. & Santos, G.d.A. (2007) Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da amazônia (Terra Preta). *Acta Amazonica*, **37**, 91-98.
- Dangerfield, J.M., Pik, A.J., Britton, D., Holmes, A., Gillings, M., Oliver, I., Briscoe, D. & Beattie, A.J. (2003) Patterns of invertebrate biodiversity across a natural edge. *Austral Ecology*, **28**, 227-236.
- di Castri, F., Hansen, A.J. & Holland, M.M. (1988) A New Look at Ecotones: Emerging International Projects on Landscape Boundaries. *Biology International, Special Issue 17*, 1-163.
- Eiten, G. (1972) The cerrado vegetation of Brazil. *The Botanical Review*, **38**, 201-341.
- Erdős, L., Zalatnai, M., Morschhauser, T., Bátori, Z. & Körmöczi, L. (2011) On the terms related to spatial ecological gradients and boundaries. *Acta Biologica Szegediensis*, **55**, 279-287.
- Fearnside, P.M. (2001) Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. *Environmental Conservation*, **28**, 23-38.
- Fearnside, P.M. (2006) Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazonica*, **36**, 395-400.
- Fearnside, P.M. & Graça, P.M.L.A. (2006) BR-319: Brazil's manaus-porto velho highway and the potential impact of linking the arc of deforestation to central Amazonia. *Environmental Management*, **38**, 705-716.
- Fearnside, P.M., Righi, C.A., Graca, P.M.L.D., Keizer, E.W.H., Cerri, C.C., Nogueira, E.M. & Barbosa, R.I. (2009) Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondonia. *Forest Ecology and Management*, **258**, 1968-1978.
- Ferreira, L.V., Venticinque, E. & Almeida, S. (2005) O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos Avançados*, **19**, 157-166.
- Fisch, G., Marengo, J.A. & Nobre, C.A. (1998) Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazonica*, **28**, 101-126.
- Flynn, E.S. (2006) *Using NDVI as a Pasture Management Tool*. University of Kentucky.
- Fuller, D.O. (1998) Trends in NDVI time series and their relation to rangeland and crop production in Senegal, 1987-1993. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 2013-2018.
- Futuyma, D.J. & Moreno, G. (1988) The Evolution of Ecological Specialization. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **19**, 207-233.
- Garner, T.W.J., Pearman, P.B. & Angelone, S. (2004) Genetic diversity across a vertebrate species' range: a test of the central-peripheral hypothesis. *Molecular Ecology*, **13**, 1047-1053.
- Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C. & Weidner, V.R. (1965) Spectral Properties of Plants. *Applied Optics*, **4**, 11-20.
- Gilmanov, G.T., Johnson, A.D., Saliendra, Z.N., Akshalov, K. & Wylie, K.B. (2004) Gross Primary Productivity of the True Steppe in Central Asia in Relation to NDVI: Scaling up

- CO₂ Fluxes. *Environmental Management*, **33**, S492-S508.
- Haridasan, M. (1982) Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. *Plant and Soil*, **65**, 265-273.
- Hijmans, R.J. (2015) *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*.
- Hofer, U., Bersier, L.F. & Borcard, D. (2000) Ecotones and gradient as determinants of herpetofaunal community structure in the primary forest of Mount Kupe, Cameroon. *Journal of Tropical Ecology*, **16**, 517-533.
- IBGE (2004) Mapa de Biomas do Brasil. In: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.
- INMET (2015) *Gráficos Climatológicos do Brasil*. Available at: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos> (accessed 01/05/2016 2016).
- INPE (2012) *Dados TerraClass 2012*. Available at: http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2012.php (accessed 11/27/2015).
- Kark, S. & van Rensburg, B.J. (2006) Ecotones: Marginal or central areas of transition? *Israel Journal of Ecology & Evolution*, **52**, 29-53.
- Kernaghan, G. & Harper, K.A. (2001) Community structure of ectomycorrhizal fungi across an alpine/subalpine ecotone. *Ecography*, **24**, 181-188.
- Killeen, T.J. & Solórzano, L.A. (2008) Conservation strategies to mitigate impacts from climate change in Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **363**, 1881-1888.
- Kirkman, L.K., Drew, M.B., West, L.T. & Blood, E.R. (1998) Ecotone characterization between upland longleaf pine/wiregrass stands and seasonally-ponded isolated wetlands. *Wetlands*, **18**, 346-364.
- Klink, C.A. & Machado, R.B. (2005) Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conservation Biology*, **19**, 707-713.
- Kolasa, J. & Zalewski, M. (1995) Notes on ecotone attributes and functions. *Hydrobiologia*, **303**, 1-7.
- Lacher, T.E. & Alho, C.J.R. (2001) Terrestrial small mammal richness and habitat associations in an Amazon Forest-Cerrado contact zone. *Biotropica*, **33**, 171-181.
- Laurance, W.F., Albernaz, A.K.M., Fearnside, P.M., Vasconcelos, H.L. & Ferreira, L.V. (2004) Deforestation in Amazonia. *Science*, **304**, 1109-1109.
- Livingston, B.E. (1903) The Distribution of the Upland Plant Societies of Kent County, Michigan. *Botanical Gazette*, **35**, 36-55.
- Lloyd, H., Rios, S.S., Marsden, S.J. & Valdes-Velasquez, A. (2012) Bird community composition across an Andean tree-line ecotone. *Austral Ecology*, **37**, 470-478.
- Malmstrom, C.M., Butterfield, H.S., Barber, C., Dieter, B., Harrison, R., Qi, J., Riaño, D., Schrottenboer, A., Stone, S., Stoner, C.J. & Wirka, J. (2009) Using Remote Sensing to Evaluate the Influence of Grassland Restoration Activities on Ecosystem Forage Provisioning Services. *Restoration Ecology*, **17**, 526-538.
- Marimon, B.S., De S. Lima, E., Duarte, T.G., Chierogatto, L.C. & Ratter, J.A. (2006) Observations on the Vegetation of Northeastern Mato Grosso, Brazil. Iv. An Analysis of the Cerrado–Amazonian Forest Ecotone. *Edinburgh Journal of Botany*, **63**, 323.
- Menke, S.B. (2003) Lizard community structure across a grassland - creosote bush ecotone in the Chihuahuan Desert. *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie*, **81**, 1829-1838.
- Miranda, H.S., Bustamante, M.M.C. & Miranda, A.C. (2002) The Fire Factor. *The Cerrados of Brazil. Ecology and natural history of a neotropical savanna* (ed. by P.S. Oliveira and R.J. Marquis), pp. 51-68. Columbia University Press, New York.

- Moreira, A. & Costa, D.G. (2004) Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **39**, 1013-1019.
- Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W. & Franca, M.B. (2007) Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. *Forest Ecology and Management*, **248**, 119-135.
- Nogués-Bravo, D. & Martinez-Rica, J.P. (2004) Factors controlling the spatial species richness pattern of four groups of terrestrial vertebrates in an area between two different biogeographic regions in northern Spain. *Journal of Biogeography*, **31**, 629-640.
- Oindo, B.O. (2002) Patterns of herbivore species richness in Kenya and current ecoclimatic stability. *Biodiversity and Conservation*, **11**, 1205-1221.
- Oliveira-Filho, A.T. & Ratter, J.A. (2002) Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado biome. *The Cerrados of Brazil. Ecology and natural history of a neotropical savanna* (ed. by P.S. Oliveira and R.J. Marquis), pp. 91-120. Columbia University Press, New York.
- Pandey, M. & Rajora, O.P. (2012) Higher fine-scale genetic structure in peripheral than in core populations of a long-lived and mixed-mating conifer - eastern white cedar (*Thuja occidentalis* L.). *BMC Evolutionary Biology*, **12**, 1-14.
- Parsons, P.A. (1990) The metabolic cost of multiple environmental stresses: implications for climatic change and conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, **5**, 315-317.
- Pianka, E.R. (1966) Latitudinal gradients in species diversity: a review of concepts. *American Naturalist*, **100**, 33-46.
- Prance, G. & Lovejoy, T. (1985) *Amazonia*. Pergamon Press, Oxford.
- R Core Team (2015) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Ratter, J.A. (1992) Transitions between cerrado and forest vegetation in Brazil. *Nature and Dynamics of Forest-Savanna Boundaries* (ed. by P.A. Furley, J. Proctor and J.A. Ratter), pp. c417-429. Chapman & Hall, London.
- Ratter, J.A., Richards, P.W., Argent, G. & Gifford, D.R. (1973) Observations on the Vegetation of Northeastern Mato Grosso: I. The Woody Vegetation Types of the Xavantina-Cachimbo Expedition Area. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **266**, 449-492.
- Risser, P.G. (1995) The status of the science examining ecotones - A dynamic aspect of landscape is the area of steep gradients between more homogeneous vegetation associations. *Bioscience*, **45**, 318-325.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1973) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *3rd ERTS Symposium*, pp. 309-317. NASA SP-351 I
- Safriel, U.N., Volis, S. & Kark, S. (1994) Core and Peripheral-Populations and Global Climate-Change. *Israel Journal of Plant Sciences*, **42**, 331-345.
- Salazar, L.F., Nobre, C.A. & Oyama, M.D. (2007) Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, **34**, n/a-n/a.
- Sano, E.E., Ferreira, L.G., Asner, G.P. & Steinke, E.T. (2007) Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. *International Journal of Remote Sensing*, **28**, 2739-2752.
- Schlemmer, M.R., Francis, D.D., Shanahan, J.F. & Schepers, J.S. (2005) Remotely Measuring Chlorophyll Content in Corn Leaves with Differing Nitrogen Levels and

- Relative Water Content. *Agronomy Journal*, **97**
- Schultz, P.A. & Halpert, M.S. (1993) Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances in Space Research*, **13**, 277-280.
- Schuur, E.A.G. (2003) Productivity and global climate revisited: The sensitivity of tropical forest growth to precipitation. *Ecology*, **84**, 1165-1170.
- Senft, A.R. (2009) *Species diversity patterns at ecotones*. University of North Carolina, Chapel Hill.
- Smith, T.B., Wayne, R.K., Gorman, D.J. & Bruford, M.W. (1997) A role for ecotones in generating rainforest biodiversity. *Science*, **276**, 1855-1857.
- Teepe, R., Dilling, H. & Beese, F. (2003) Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **166**, 111-119.
- Temple, S.A. (1998) Surviving where ecosystems meet: ecotonal animal communities of midwestern oak savannas and woodlands. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*, **86**, 207-222.
- Todd, S.W., Hoffer, R.M. & Milchunas, D.G. (1998) Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 427-438.
- U.S.G.S. (2014) *Landsat 5 History*. Available at: http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php (accessed 11/27/2015 2015).
- U.S.G.S. (2015a) *Earth Explorer*. Available at: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 11/27/2015).
- U.S.G.S. (2015b) *Landsat 8*. Available at: <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php> (accessed 11/27/2015 2015).
- Urbina-Cardona, J.N., Olivares-Perez, M. & Reynoso, V.H. (2006) Herpetofauna diversity and microenvironment correlates across a pasture-edge-interior ecotone in tropical rainforest fragments in the Los Tuxtlas Biosphere Reserve of Veracruz, Mexico. *Biological Conservation*, **132**, 61-75.
- van der Maarel, E. (1990) Ecotones and ecoclines are different. *Journal of Vegetation Science*, **1**, 135-138.
- Werneck, F.P. (2011) The diversification of eastern South American open vegetation biomes: Historical biogeography and perspectives. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 1630-1648.
- Werneck, F.P., Nogueira, C., Colli, G.R., Sites, J.W. & Costa, G.C. (2012) Climatic stability in the Brazilian Cerrado: implications for biogeographical connections of South American savannas, species richness and conservation in a biodiversity hotspot. *Journal of Biogeography*, **39**, 1695-1706.
- Wiens, J.A., Crawford, C.S. & Gosz, J.R. (1985) Boundary dynamics: a conceptual framework for studying landscape ecosystems. *Oikos*, **45**, 421-427.
- Zhang, J., Zhang, L., Xu, C., Liu, W., Qi, Y. & Wo, X. (2014) Vegetation variation of mid-subtropical forest based on MODIS NDVI data — A case study of Jinggangshan City, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, **34**, 7-12.